

The Design of Electric Vehicle Charging Pile Energy Reversible

Changzhi Lv¹, Xuefeng Wang¹, Lihua Xie²

¹Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²Sheng Zhen Ecowatt Power Co. Ltd., Shenzhen Guangdong

Email: lvchangzhi@126.com

Received: Apr. 8th, 2017; accepted: Apr. 24th, 2017; published: Apr. 27th, 2017

Abstract

With the continuous development of electric vehicles, the charging pile is also getting higher and higher. The focus of the traditional charging pile is the speed of the charging speed, multi-functionalization and intellectualization. In this paper, a design scheme of charging pile for electric vehicle with high power and energy is given. The structure diagram and control principle of the system are given. The electric vehicle charging pile can realize the fast charging of electric vehicles, and the battery of the electric vehicle can be used as the energy storage element, and the electric energy can be fed back to the power grid to realize the bidirectional flow of the energy. Power factor of the system can be close to 1, and there is a significant effect of energy saving.

Keywords

Charging Pile, Energy Reversible, Electric Vehicle, Energy Conservation, Power Factor

能量可回馈的电动汽车充电桩设计

吕常智¹, 王学峰¹, 谢力华²

¹山东科技大学, 山东 青岛

²深圳伊力科电源有限公司, 广东 深圳

Email: lvchangzhi@126.com

收稿日期: 2017年4月8日; 录用日期: 2017年4月24日; 发布日期: 2017年4月27日

摘要

随着电动汽车的不断发展, 对充电桩的要求也越来越高。传统的充电桩关注的重点是充电速度的快慢、

多功能化、智能化。本文给出一种大功率能量可回馈的电动汽车充电桩的设计方案；给出了该系统的结构图及控制原理。该电动汽车充电桩可实现对电动汽车的快速充电，同时又能将电动汽车的蓄电池作为储能元件，把电能回馈到电网，实现能量的双向流动。系统的功率因数可接近1，有明显的节能效果。

关键词

充电桩，能量可逆，电动汽车，节能环保，功率因数

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

能源匮乏、环境恶化使得具有节能环保优势的电动汽车受到了全球的关注[1] [2]。现在有关电动汽车充电桩的研究，关注的重点一般是充电速度、智能监控、REIP 无线射频技术等，这些是对电动汽车充电桩基本特性的研究。在日常生活中，根据一般的用车情况，电动汽车的使用率大约占全天时间的百分之十，电动汽车在大部分时间里是处于闲置状态。对于燃料汽车来说是没有什么影响的，而对于电动汽车来说，其主要是依靠动力电池来为其提供能量，在闲置状态下，电动汽车动力电池是没有什么作用的，如果设计一种能量可回馈的电动汽车充电桩，在电动汽车闲置状态下，动力电池通过电动汽车充电桩将电能返还给电网，以缓解电网的压力。

本文基于三电平 PWM 变流器，直流侧通过 buck/boost 变换器稳压，对电动汽车充电桩的充电模式和电动汽车能量回馈模式进行了分析与仿真，根据实验验证，具有很高的效率。目前我国没有进行全电网实时监控的情况下，这种设备可以在小区、商业区、医院等公共场所建设，当遇到紧急停电的时候，可由停车场里面的电动汽车通过此设备提供电能，可大大减少能量的损耗，起到明显的节能效果，对电动汽车的发展有着重要意义。

2. 系统原理图

该系统有两种工作模式：充电模式和电动汽车能量回馈模式。图 1 给出设计的电动汽车充电桩运行于两种模式的控制系统结构。从系统原理上可分为三电平 PWM 变流器和双向 DC-DC 变换器两个子系统 [3] [4] [5] [6]。主要包括网侧滤波器、三电平 PWM 变流器、双向 DC-DC 变换器和直流侧滤波器四部分。本设计的充电桩系统主要包括两大工作模式：正常充电模式和电动汽车能量回馈模式。运行于充电模式时通过三相 PFC 升压控制实现 AC/DC 变换，将市电的交流电压转换成直流电压，通过 DC-DC 变换器将高压直流电转换为电动汽车充电所需要的电压；运行于电动汽车能量回馈模式时通过三相 PFC 恒压逆变控制实现 DC/AC 变换，将电池释放的能量回馈给电网；双向 DC-DC 变换器完成逆变直流电能与蓄电池电能的转换，保证蓄电池充放电过程所要求的电流、电压和时间控制[7] [8] [9] [10] [11]。

图 2 给出三电平 PWM 变流器采用的典型电压型主电路结构。市电输入的三相电经过熔断器接 LC 滤波器，即网侧滤波器。主要作用为滤除三电平 PWM 变流器产生的高频谐波，一是改善了电网侧的输入电流，二是当运行于回馈模式时，使得馈入电网的三相电流为纯正弦波，提升电源系统的 THDi 指标。如图，本设计网侧滤波器具有 LCL 滤波结构，此外还有传统的 L 和 LC 结构的滤波器。相较于传统的滤波器结构，LCL 结构的滤波器在电路上体现为三阶滤波器，这样的好处是对谐波的衰减能力大大提高，

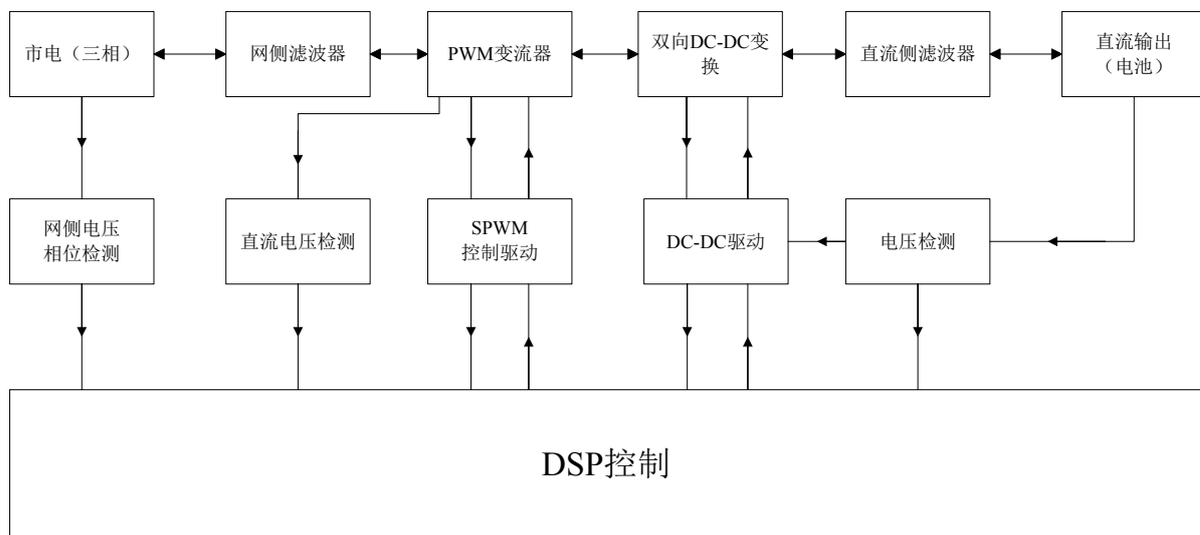


Figure 1. System structure diagram

图 1. 系统结构框图

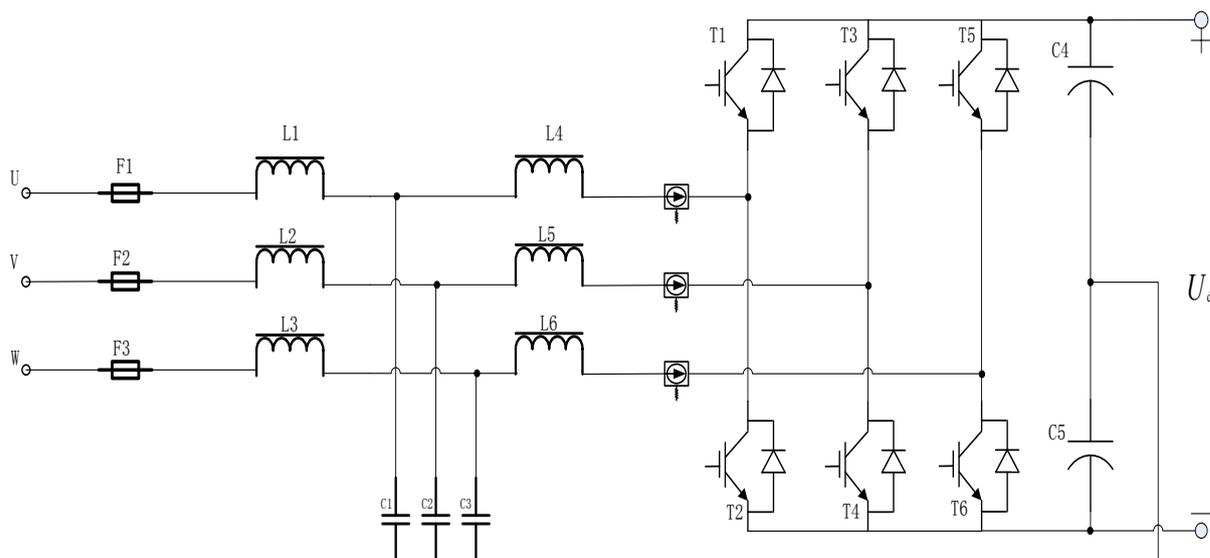


Figure 2. Three level PWM converter

图 2. 三电平 PWM 变流器

实际结构上占用空间小且还能实现较高的 THDi 指标；运用 LCL 滤波器的另一优点就是能有效抑制网侧谐波电流灌入充电桩系统，这样有利于减小滤波器电容的电流应力，以提高充电桩系统的稳定性和可靠性。

为抑制变流器产生的高频共模电压，提高电源系统的电磁兼容性能，本设计将网侧滤波器中 Y 型连接的滤波电容器的中性点与直流母线电容的中性点直接连接，因此本设计中网侧滤波器，既是差模滤波器也是共模滤波器，这样就能有效的滤除变流器产生的开关频率级的高频共模电压。

图 3 所示为双向 DC-DC 变换器电路结构，该变换器在系统的两大工作模式下有着不同的工作方式。当系统工作在充电模式的时候，DC-DC 变换器工作模式是 Buck 变换模式，该模式将高压恒定的直流母线电压经过高频降压转换为可调的直流电压输出，输出范围在 0 V 到 600 V；当系统工作在电动汽车能量

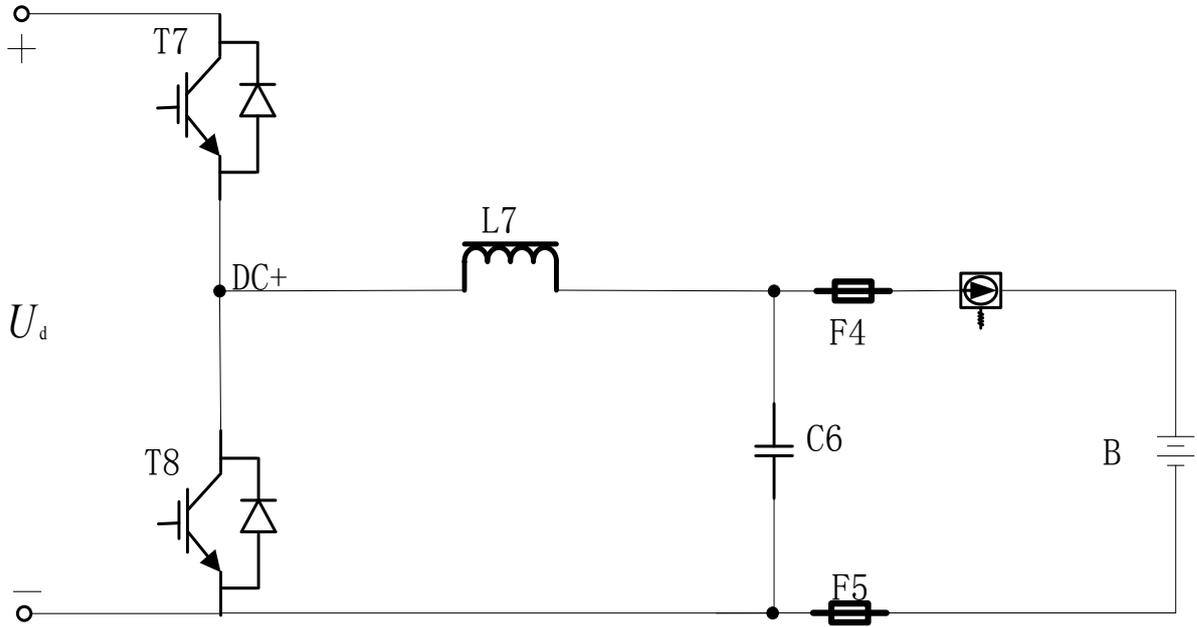


Figure 3. Bidirectional DC-DC converter
图 3. 双向 DC-DC 变换器

回馈模式时，DC-DC 变换器工作模式时 Boost 变换模，该模式将电动汽车蓄电池回馈的直流电能通过高频升压转换，变换为设计的直流母线电压，最终由三电平 PWM 变流器将回馈的能量馈入电网。本设计中双向 DC-DC 变换器采用 Buck-Boost 双向变换电路，半导体开关器件采用最新一代 IGBT 模块，该电路拓扑结构简单，可靠性高，是实现非隔离双向 DC-DC 变换的优选电路拓扑。

3. 系统控制原理

1、PWM 变流器工作机制

本设计采用基于开关函数法实现 SVPWM 逆变控制，开关函数法可以大大简化计算过程，提高计算精度，并在工业变频器的产品开发中获得了很好的控制效果[12] [13]。

开关函数，就是一组给定的输入电压和期望输出电压，在各种约束条件下来控制功率开关的通断状态，变换器中同一桥臂上下功率开关的开关函数表达式：

$$\begin{cases} T_{\text{上管}} = \frac{1}{2} \left(1 + q \frac{\text{期望输出电压}}{\text{直流侧电压}/2} \right) \\ T_{\text{下管}} = \frac{1}{2} \left(1 - q \frac{\text{期望输出电压}}{\text{直流侧电压}/2} \right) \end{cases}$$

其中， $T_{\text{上管}}$ 和 $T_{\text{下管}}$ 分别描述任一桥臂上管与下管瞬时占空比的开关函数， q 为调制度，直流侧电压不排除允许一定程度的波动。具体的 SVPWM 控制方法，逆变器的开关函数矩阵可以描述为

$$T = \begin{pmatrix} T_1 & T_3 & T_5 \\ T_4 & T_6 & T_2 \end{pmatrix}$$

其中， T_1 与 T_4 、 T_3 与 T_6 、 T_5 与 T_2 分别表示逆变器第一、第二、第三桥臂上管与下管的瞬时占空比函数。由开关函数所描述的物理意义，开关函数矩阵中各函数元素必须满足以下关系： $T_i \geq 0, i=1, \dots, 6$ ， $T_1 + T_4 = 1, T_3 + T_6 = 1, T_5 + T_2 = 1$ 。

2、PWM 变流器控制

PWM 变流器直流侧母线电压 U_d 的恒压控制品质好坏是整个系统能否可靠高效工作的关键，设计采用电压、电流双闭环控制结构，其中电压控制对象为直流量，电流控制对象为交流量，为保证直流母线电压的无静差，选用 PI 控制方法。对该设计而言，考虑到性能价格的因素，直流滤波电容 C 的耐压裕量不益选择得过高，因此期望在直流母线控制调节的动态过程中尽可能减小电压超调。常规 PI 算法较难兼顾快速调节和小超调的要求。很多实验表明，PI 调节的性能很难通过参数整定达到满意的程度，图 4 示出 PI 调节器结构。为此，设计中选用为抑制电机控制超调常采用的 IP 调节器作为电压调节器。由图 4 可知，采用 IP 调节器时系统的传递函数为：

$$\frac{U_d(s)}{U_r(s)} = \frac{K_i G(s)}{K_i G(s) + s[1 + K_p G(s)]}$$

采用相同比例和积分数的 PI 调节器时系统的传递函数为：

$$\frac{U_d(s)}{U_r(s)} = \frac{K_i + sK_p G(s)}{K_i G(s) + s[1 + K_p G(s)]}$$

由式(1)和式(2)可见，两种系统传递函数分母相同，故 IP 调节器可持有 PI 相同的无静差调节和稳定特性，同时因在传递函数上它比 PI 少一个零点，因此具有比 PI 更好的高频衰减特性，容易满足较长采样周期数字调节的稳定性要求，能有效抑制混迭现象。系统实验证明，采用 IP 调节，调节器参数很容易整定，使系统达到稳定、无静差和很小超调，在快速性方面几乎没有影响。由图 4 不难得到 IP 调节的数字算法为：

$$U_{OK} = U_{ik} - K_p U_{dk}$$

计算结果经过最大限幅和锁相处理后通过 D/A 转换器形成模拟电流环控制指令输出。为保证功率因数，模拟电流调节器采用无滞后的纯比例调节器。

4. 仿真以及实验结果

为了验证控制策略的有效性，采用 PSIM 仿真软件对能量可逆的电动汽车充电桩系统进行仿真分析。电动汽车充电桩额定容量 $S = 60 \text{ Kva}$ 。

当设备运行在充电状态时，仿真结果显示直流母线电压为 700 V，经 DC-DC 变换器后的电压为 300 V，电流为 2 A (比例为 1:200)，仿真结果如下。

电动汽车充电桩运行在充电模式时：

图 5 中纵坐标表示电网侧的电流 I_a (图中红色)和电压 V_{in_ab} (图中蓝色)；横坐标为时间轴。

图 6 中纵坐标表示变流器侧直流母线电压 V_{bus} ；横坐标为时间轴。

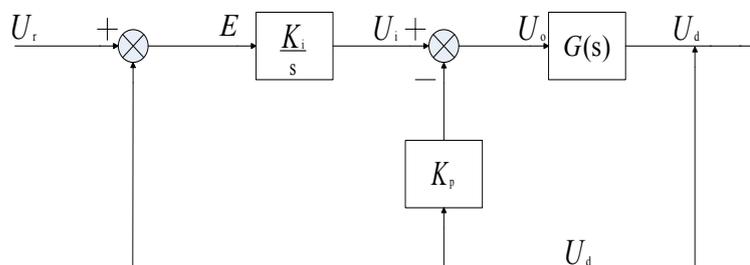


Figure 4. Structure of IP regulator

图 4. IP 调节器的结构

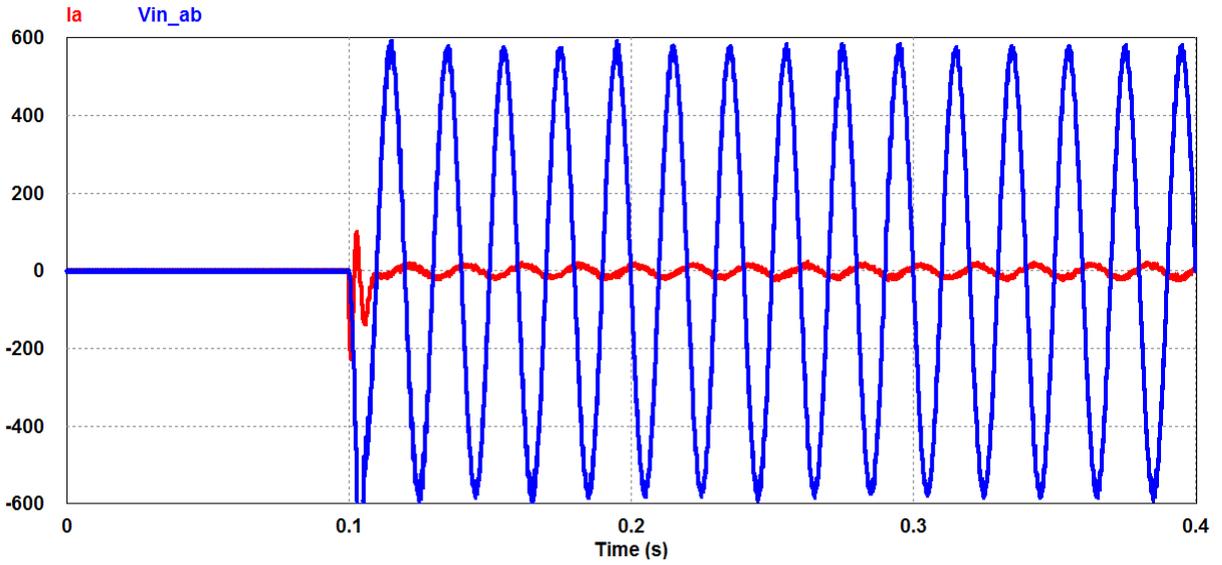


Figure 5. Grid side voltage and current

图 5. 电网侧电压电流

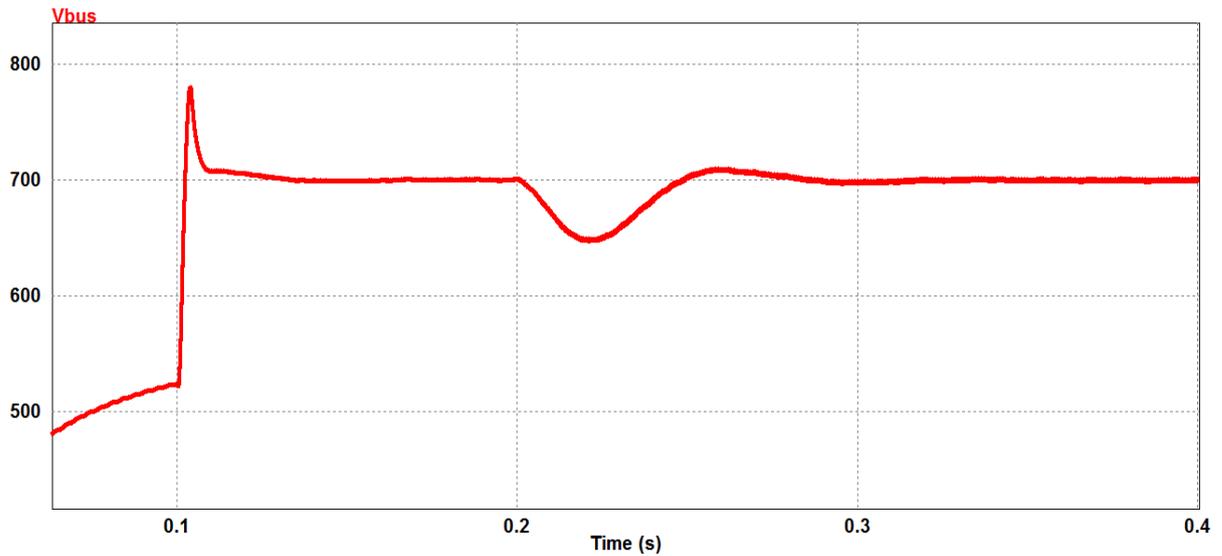


Figure 6. Converter DC bus voltage

图 6. 变流器直流母线电压

图 7 中纵坐标表示蓄电池的充电电压 V_{bat} ；横坐标为时间轴。

当设备运行在电动汽车能量回馈状态时，用 300 V 直流电压源模拟电池，仿真结果显示直流母线电压为 650 V，交流侧馈回电网的电压为交流电压。仿真结果如下。

电动汽车充电桩运行于能量回馈状态：

图 8 中纵坐标表示变流器侧直流母线电压 V_{bus} ；横坐标为时间轴。

图 5 中纵坐标表示电网侧的电流 I_a (图中红色)和电压 V_{in_ab} (图中蓝色)；横坐标为时间轴。

由图 5、图 6、图 7，充电桩运行于充电模式时，电网电压与三电平整流器交流输入电流的相位、频率基本一致，功率因数接近于 1，能量由电网侧流向电动汽车蓄电池。直流母线电压经过双向 DC-DC 变流器斩波，输出电压在短暂的震荡后稳定在 300 V，保持对电动汽车蓄电池充电，证明控制策略有效。

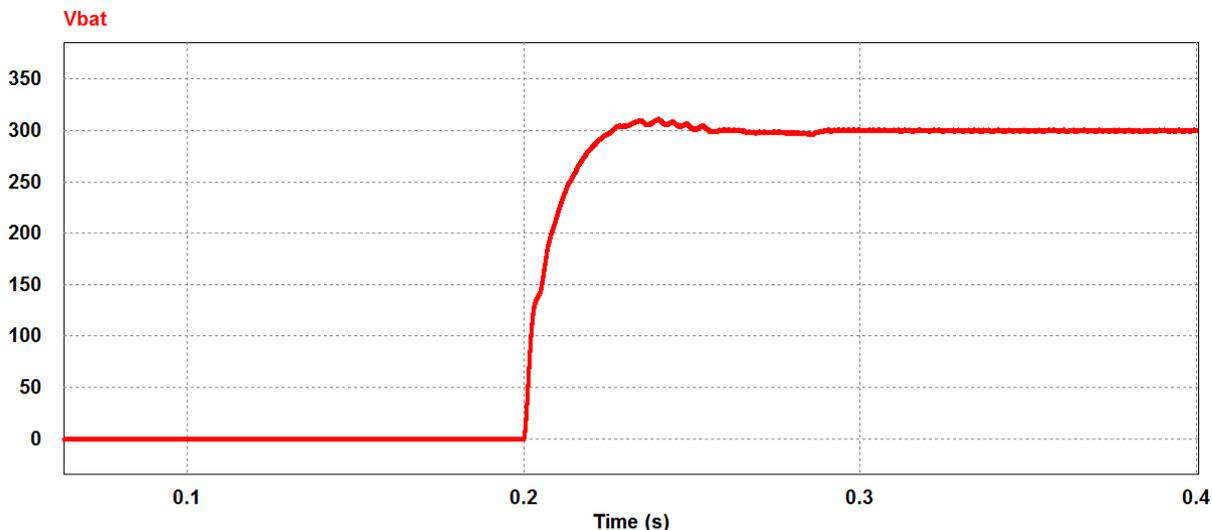


Figure 7. Battery charging DC voltage
图 7. 蓄电池充电直流电压

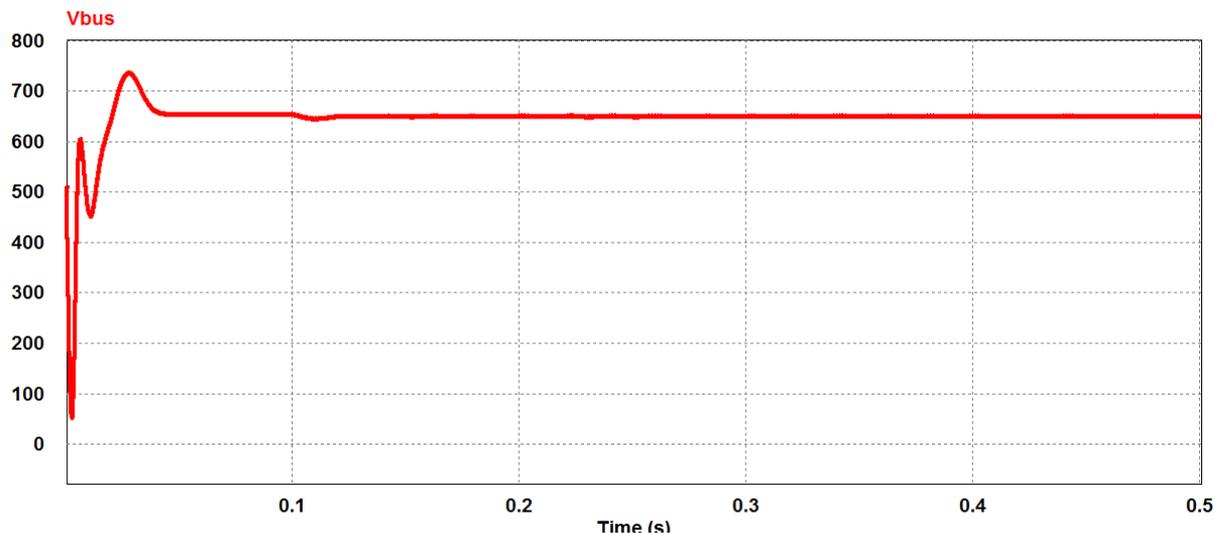


Figure 8. Converter DC bus voltage
图 8. 变流器直流母线电压

由图 8、图 9，滤波前逆变输出电压呈良好的三电平状态；滤波后逆变输出电流相位相反，功率因数接近-1，能量从电动汽车蓄电池侧流向电网侧。

5. 结论

本文设计了一种新型的电动汽车充电桩，运用基于开关函数法模拟 SVPWM 空间矢量调制，使开关频率降低，大大减少了开关损耗；运用 IP 调解器对电压、电流进行双环控制方式，使系统性能得到很大改善；通过仿真验证可知该系统具有良好的动、静态特性。当充电桩工作在充电模式时，直流输出电压保持恒定，具有较高的精度和稳定性；当充电桩工作在能量回馈模式时，三电平 PWM 变流器能输出紧密跟踪参考电流变化的正弦电流，功率因数接近-1，可实现系统的高功率因数运行。

当前，随着 V2G 技术的不断发展，电动汽车充电桩不再只是用来充电，当电动汽车闲置在停车场时，

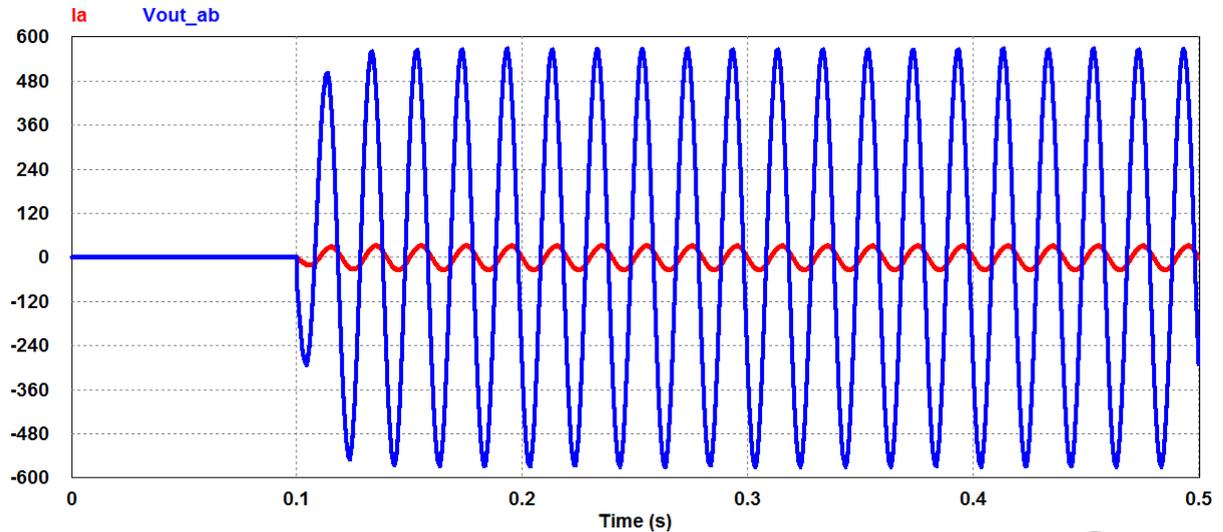


Figure 9. Grid side voltage and current
图 9. 电网侧电压电流

可以通过这种电动汽车充电桩将车内的电能回馈给电网，缓解电网高峰期用电的压力，当公共场所紧急停电时，可用这种充电桩将电动汽车的电池能量馈入相应的配电箱，作为应急电源车来使用。

基金项目

本论文得到山东省高等学校青年骨干教师国内访问学者项目经费资助。

参考文献 (References)

- [1] 王旭. 电动汽车智能充电桩的设计与研究[J]. 机电工程, 2014, 3(1): 393-396.
- [2] 杨文海. 基于需求侧管理的电动汽车能量调控机制的研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- [3] 王鹿军. 分布式发电中三相三电平并网逆变器的若干关键技术的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [4] 蔡克卫. 基于 LCL 滤波器的微网逆变器控制策略研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [5] 陈道炼. 双向大升压比直流变换器型逆变器[J]. 电工技术学报, 2010(6): 55-62.
- [6] 郑昕昕. 一种半周期 SVPWM 控制的三相双向 Buck-Boost 变流器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 19-28.
- [7] Mantooth, H.A. (2009) Electro-thermal Simulation of an IGBT PWM Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Application*, **45**, 75-84.
- [8] Casanellas, F.M. (1994) Losses in PWM Inverters Using IGBT. *IEEE Transactions on Power Electronic*, **4**, 235-238. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19941349>
- [9] Wang, K., Lee, F.C. and Borojevic, D. (1994) A Comparative Study of Switching Losses of IGBT under Hard-Switching. *Power Electronics Specialists Conference 25th Annual IEEE*, 11-14.
- [10] Pendharkar, S. and Shenai, K. (2008) Electrothermal Simulations in Punchthrough and Nonpunchthrough IGBT's. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **10**, 2222-2231.
- [11] Hefner, A.R. and Diebolt, D.M. (2009) An Experimentally Verified IGBT Model Implemented in the Sabercircuit Simulator. *IEEE Transactions on Industrial Application*, **31**, 10-19.
- [12] 周永鹏. 三相 SPWM 双向逆变器电压控制的数字化设计[J]. 电力电子技术, 2004, 38(1): 42-44.
- [13] 钟诚. 分布式发电系统中双向逆变器控制关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2013.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org